

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh proudového kompresoru pro ohřev napájecí vody, kde pracovní médium je voda z napájecí předlohy a nasávanou parou je sytá pára z bubnu parního kotle.

Proposal Turbojet Compressor for Warming-up Feed Water, where Working Liquid is Water from Feeding Model and Sucker by Steam is Sick of Vapour from Diamond Steam-boiler

Student:

Bc. Jiří Fogaraši

Vedoucí diplomové práce:

doc.ing. Kamil Kolarčík. CSc

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Fogaraši**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**

Téma: **Návrh proudového kompresoru pro ohřev napájecí vody, kde pracovní kapalinou je voda z napájecí předlohy a nasávanou parou je sytá pára z bubnu parního kotle**
Proposal Turbojet Compressor for Warming-up Feed-water, where Working Liquid is Water from Feeding Model and Sucker by Steam is Sick of Vapour from Diamond Steam-boiler

Zásady pro vypracování:

Parní kotel s výkonem 75 t/h páry, tlakem 6,4 MPa a teplotou 500 °C, spalující hnědé uhlí je projektován pro teplotu napájecí vody 165 °C. V důsledku poruchy vysokotlakého ohříváku napájecí vody se snížila teplota napájecí vody na vstupu do kotle na 120 °C.

Úkolem diplomové práce je návrh proudového přístroje, který tento výpadek dokáže eliminovat.

Hnací médium je napájecí voda, nasávaným médiem je pára, odebíraná z bubnu kotle.

Množství ohříváné vody 20,83 kg/s,

teplota napájecí vody - vstup 120 °C,

teplota napájecí vody - výstup 145 °C,

tlak v bubnu kotle 6,8 MPa.

Seznam doporučené odborné literatury:

Kolarčík, K.: Proudové kompresory. VŠB-TUO, Ostrava 1994.

Kalčík, J.: Technická termodynamika. Academia, Praha 1973.

Baehr, H., D.: Termodynamik. Springer-Verlag, Berlin /Heidelberg/ New York 1966.

Hibš, M.: Proudové přístroje. SNTL Praha 1981, 183 s.

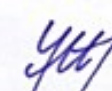
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

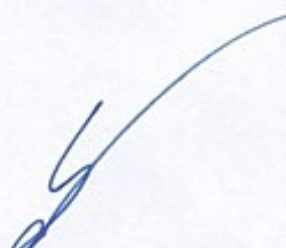
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlášení studenta

byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).

souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO

bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.

bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:.....

Adresa trvalého pobytu autora práce:.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce, za jeho trpělivost, ochotu a vstřícnost, ale především za cenné rady, jež jsem při psaní této práce využil, doc.ing.Kamilu Kolarčíkovi CSc.

Zároveň bych chtěl poděkovat celé své rodině, za podporu s níž mě provázela celým studiem.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FOGARAŠI, J. *Návrh proudového kompresoru pro ohřev napájecí vody: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 45s, Vedoucí práce: Kolarčík, K.

Klíčová slova: proudový kompresor, dýza, směšovací komora, difuzor

Diplomová práce se zabývá návrhem konkrétního proudové přístroje, pro zapojení v teplárně jako havarijní náhrada vysokotlakého ohřevu napájecí vody pro teplárenský kotel. Teoretická část rozebírá jednotlivé části proudového přístroje, což je dýza, směšovací komora a difuzor, tedy fyzikální děje, jež v nich probíhají. Tyto procesy uvádím jak na schématech tak v diagramech. Praktická část mé práce ukazuje výpočet rozměrů navrženého proudového přístroje, jež ohřeje napájecí vodu pomocí syté páry z bubnu kotle na požadovanou teplotu. Zabývám se teoretickým návrhem a počítám s idealizujícími předpoklady pro proudící média i proudový přístroj. Výstupem této práce bude výkresová dokumentace navrženého proudového přístroje s výpočtem jeho hlavních rozměrů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

FOGARAŠI, J. *Proposal Turbojet Compressor for Warming-up Feed Water : Master Thesis.* Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering Department of Energetics, , 2014, 45p, Thesis head: Kolarčík, K.

Key Words: Turbojet Compressor, Nozzle, Mixing Chamber, Diffuser

Thesis is dealing with a proposal of specific turbojet compressor in application of substitute for high pressure heat exchanger for warming-up feed water for diamond steam-boiler. Theoretical part analyzes every single part of turbojet machine such as nozzle, mixing chamber and diffuser as well as physical processes inside of them. These processes are shown in schemes and diagrams. Practical part is showing calculation of main proportions of designed turbojet machine which is able to warm-up feed water with sick vapour to demanded temperature. I am working with theoretical assumptions of ideal fluids and liquids and ideal physical processes in turbojet machine. Output of this thesis is drawings of designed turbojet machine with calculations its main proportions.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	9
1 Úvod	12
2 Představení proudových kompresorů	13
2.1 Historie proudových přístrojů	13
2.2 Základní vlastnosti proudových přístrojů.....	14
2.3 Dýza	15
2.4 De Lavalova dýza.....	18
2.5 Proudění z kruhové výústky	21
2.6 Směšovací komora	23
2.7 Difuzor	25
3 Aplikace navrhovaného proudového přístroje.....	28
3.1 Zapojení proudové kompresoru	29
4 Výpočtová část	30
4.1 Tepelný výpočet proudového přístroje.....	30
4.2 Množství páry pro ohřev napájecí vody	30
4.3 Rychlost proudění vody vtékající do dýzy	31
4.4 Rychlost proudění vody za dýzou	31
4.5 Rychlost proudění páry do proudového přístroje.....	32
4.5.1 Bilanční rovnice pro vstup páry do proudového přístroje.....	32
4.6 Směšovací komora	33
4.6.1 Bilanční rovnice mísení (entropií).....	33
4.6.2 Bilanční rovnice mísení (entalpií)	34
4.6.3 Měrný objem na konci směšovací komory.....	34
4.7 Rychlost na konci směšovací komory	35
4.8 Difuzor	35
4.8.1 Plošné rozšíření difusoru	35
4.8.2 Výstupní rychlost z difusoru	36

4.9	Konstrukční návrh proudového kompresoru.....	36
4.9.1	Výpočet rozměrů dýzy	36
4.9.2	Průměr dýzy	36
4.9.3	Průměr potrubí pro přívod páry.....	36
4.9.4	Vstupní průřez směšovací komory	37
4.9.5	Průměr směšovací komory	37
4.9.6	Vzdálenost směšovací komory od výstupní trysky dýzy.....	38
4.9.7	Délka směšovací komory	39
4.9.8	Plošné rozšíření difuzoru.....	40
4.9.9	Průměr difuzoru.....	40
4.9.10	Délka difuzoru.....	40
5	Závěr.....	41
	Seznam použité literatury:	42
	Seznam obrázků	43
	Seznam schémat.....	44
	Seznam příloh	45

Seznam použitých symbolů a zkratek

α - úhel rozevření kuželu výstupního proudu z dýzy	[°]
β - úhel rozevření difuzoru	[°]
χ - izoentripický koeficient	[-]
μ_D - plošné rozšíření difuzoru	[-]
Γ - ejekční součinitel	[-]
Q_1 - množství tepla potřebné pro ohřev napájecí vody	[kW]
S_{vs} - průřez vstupního potrubí	[m ²]
S_1 - plošný průřez dýzy	[m ²]
$S_{2,p}$ - plošný průřez vstupního potrubí páry	[m ²]
S_{dif} - plošný průřez konce difuzoru	[m ²]
$S_{kom,1}$ - teoretický plošný průřez začátku směšovací komory	[m ²]
T_2 - teplota páry po expanzi v dýze	[K]
T_1 - teplota páry před expanzí v dýze	[K]
H_p - hybnost páry	[kg.s ⁻¹]
H_v - hybnost vody	[kg.s ⁻¹]
H_c - celková hybnost	[kg.s ⁻¹]
\dot{Q}_v - objemový tok vody	[m ³ .s ⁻¹]
\dot{Q}_p - objemový tok páry	[m ³ .s ⁻¹]
\dot{Q}_{sm} - objemový průtok na konci směšovací komory	[m ³ .s ⁻¹]
M - machovo číslo	[-]

a - součinitel vířivosti	[-]
c_{vs} - rychlost napájecí vody na vstupu do proudového přístroje	[m·s ⁻¹]
$c_{p,1}$ - rychlost páry na vstupu do proudového přístroje	[m·s ⁻¹]
c_{vys} - rychlost napájecí vody na výstupu z proudového přístroje	[m·s ⁻¹]
$c_{p,pot}$ - rychlost páry v potrubí	[m·s ⁻¹]
$c_{2,p}$ - rychlost páry po expanzi	[m·s ⁻¹]
c_{vs} - rychlost napájecí vody v potrubí	[m·s ⁻¹]
c_3 - rychlost napájecí vody na konci směšovací komory	[m·s ⁻¹]
c_4 - výstupní rychlost z difuzoru	[m·s ⁻¹]
$c_{2,v}$ - rychlost napájecí vody za dýzou	[m·s ⁻¹]
c_{H_2O} - měrná tepelná kapacita vody	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
c_p - plošné rozšíření difuzoru	[-]
d_{vs} - průměr vstupního potrubí	[m]
$d_{kom,1}$ - skutečný průměr začátku směšovací komory	[m]
$d_{kom,1}$ - skutečný průměr začátku směšovací komory	[m]
$d_{kom,2}$ - skutečný průměr konce směšovací komory	[m]
$d_{kom,stř}$ - střední průměr směšovací komory	[m]
i_p - entalpie páry v bubnu	[kJ·kg ⁻¹]
i_{vs} - entalpie napájecí vody na vstupu do proudového přístroje	[kJ·kg ⁻¹]
i_{vys} - entalpie na výstupu z proudového přístroje	[kJ·kg ⁻¹]
$i_{p,2}$ - entalpie páry po expanzi	[kJ·kg ⁻¹]
i_3 - entalpie na konci směšovací komory	[kJ·kg ⁻¹]

l_p - vzdálenost pólu proudu od ústí dýzy	[m]
l_x - délka krajní oblasti	[m]
l_{sk} - délka směšovací komory	[m]
l_d - délka difuzoru	[m]
\dot{m}_{vs} - množství napájecí vody jdoucí do sání proudového přístroje	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_p - množství páry jdoucí do sání proudového přístroje	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_{vys} - množství napájecí vody vystupující z proudového přístroje	[kg·s ⁻¹]
Δt - rozdíl teplot pro ohřev napájecí vody	[K]
ρ_{vs} - hustota napájecí vody v potrubí	[kg·m ⁻³]
p_{vs} - tlak napájecí vody na vstupu do přístroje	[Pa]
p_2 - tlak za dýzou	[Pa]
p_4 - tlak na konci difuzoru	[Pa]
t_3 - teplota na konci směšovací komory	[°C]
$p_{2,p}$ - tlak páry po expanzi v dýze	[Pa]
p_{buben} - tlak v bubnu parního kotle	[Pa]
v_1 - měrný objem páry	[kg·m ⁻³]
r - měrná plynová konstanta	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
v_4 - měrný objem na konci směšovací komory	[kg·m ⁻³]
v_2 - měrný objem napájecí vody	[kg·m ⁻³]
s_1 - entropie páry na vstupu do směšovací komory	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
s_2 - entropie napájecí vody na vstupu do směšovací komory	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
s_3 - entropie napájecí vody na konci směšovací komory	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]

1 Úvod

Proudové kompresory jsou veřejnosti neznámým pojmem, pod kterým nevědí co si představit. Jedná se o zařízení na stlačování tekutin. Častěji slouží jako nástroje k evakuaci tekutin z daného prostředí. Odtud plyne jejich přesnější název proudové přístroje. Jejich využití je ovšem velmi limitováno nízkou účinností, která se při optimálních návrzích pohybuje okolo 30%, avšak výjimkou není ani účinnost 10%. Jednotlivé účinnostní ztráty popisují dále v mé práci. V teoretické části také věnuji několik stran o jejich nezastupitelném postavení v průmyslu a různými aplikacemi použití.

Použití tohoto přístroje pro ohřev napájecí vody je myšlenka, jež je velmi ojedinělá ne-li nulová. Ovšem díky pokročilejším studiím zabývajících se postupným odbouráváním jednotlivých ztrát proudových přístrojů, bude možné této ekonomicky úspornější varianty řešení ohřevu napájecí vody, běžnou praxí. V současnosti by se tento způsob vyplatil pouze v případech, kde náklady na pořízení dalece převyšují náklady na provozování nebo-li jako levný náhradní záskok v případech poruch či výpadků.

Zapojení proudového přístroje v zadaném případě, je jako havarijní řešení výpadku vysokotlakého ohříváku vody. Úkolem je vzít část vyrobené páry z bubnu parního kotle a přehřát s její pomocí napájecí vodu. Řešení zapojení je znázorněno na [schématu 1].

2 Představení proudových kompresorů

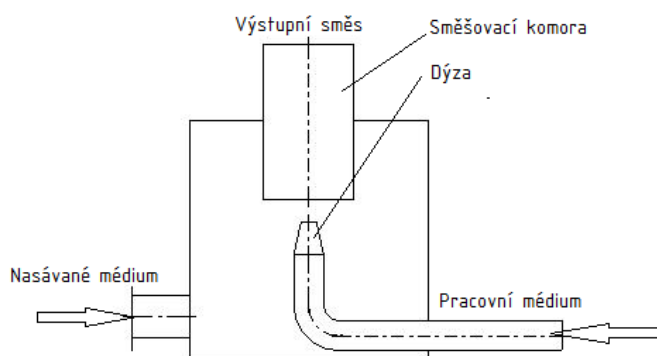
Proudové kompresory jsou sekundární energetické stroje, jež slouží ke transformaci již transformované energie. K tomu ovšem využívají energie jiné tekutiny. Pokud se tedy budeme bavit o proudových kompresorech je nutné uvést terminologii tekutin skrze ně proudících.

- pracovní médium(hnací)
- nasávané médium (hnané)

Tato zařízení se skládají z částí dýzy, směšovací komory a difuzoru. Princip činnosti spočívá v přeměně tlakové energie pracovního média na kinetickou energii. Expanze pracovní látky musí být pod hodnotu tlaku nasávaného média. Díky tomu sebou pracovní látka strhává nasávanou látku do směšovací komory. Ta slouží k vyrovnání rychlostí a tlaku. Směs látek pokračuje dále do difuzoru, kde se přemění část kinetické energie na tlakovou. Tlak na konci přeměny nebude nikdy vyšší, než tlak počátečního stavu pracovní látky. Proto komprese probíhá pouze u jedné tekutiny. Z tohoto důvodu je použití názvu proudový přístroj výstižnější. Principu činnosti se budu věnovat dále ve své práci podrobněji.

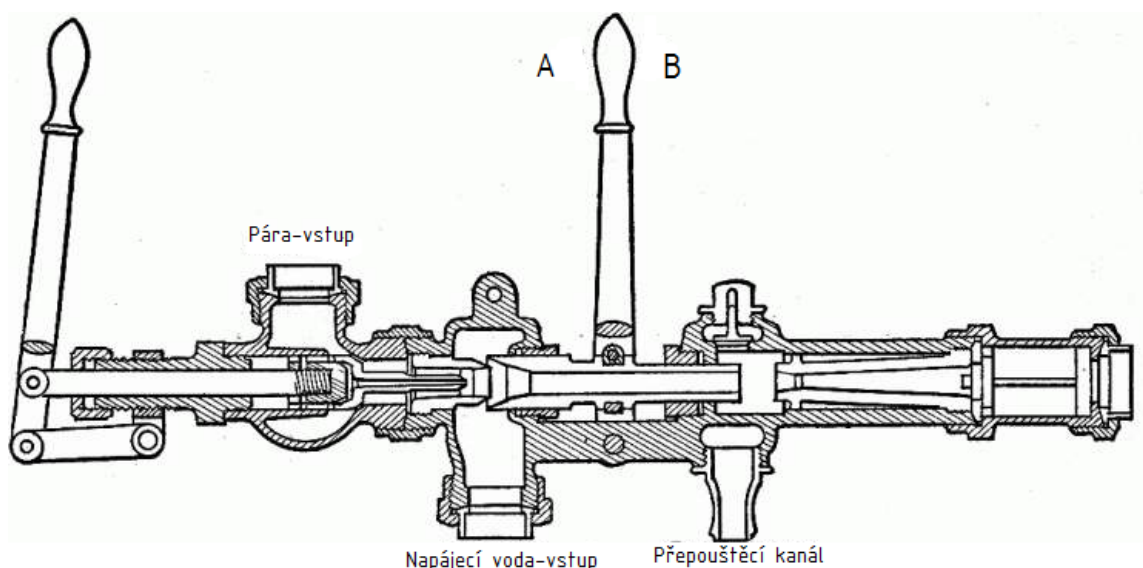
2.1 Historie proudových přístrojů

První proudový přístroj je spjat se jménem Philibert de Lorm, který v 16. století předložil proudový přístroj podobný dnešním rozstřikovačům, avšak nedočkal se prakticky žádného uplatnění. Jeho návrh zdokonalil markýz d'Ectot. Tento proudový přístroj již měl všechny části těch dnešních [Obrázek 1]. Ten však překonával jen velmi malé protitlaky, a tak se rovněž nedočkal širšího použití.



Obrázek 1 Původní návrh proudového přístroje markýze d'Ectota

Za vlastního vynálezce je považován Henri Giffard, jež si roku 1848 patentoval propudový přístroj s přepouštěcím prostorem a ventilem. Jedna ze starších verzí proudového přístroje vyráběných Rue Manufacturing Co., používaného pro ohřev napájecí vody pomocí páry je vidět na [Obrázek 2]. Tato konstrukce je unikátní pohyblivou pákou, jež přizpůsobuje množství napájecí vody pro optimální výkon. Pohybem směrem k A, přeruší průtok napájecí vody a pohybem směrem k bodu B zvyšuje průtočné množství vody. Tento způsob tedy reguluje množství vody potřebné ke kondenzaci vstupní páry. Přepouštěcí kanál je zde pouze pro regulaci při najíždění a je možné ho úplně zavřít přesunutím páky k bodu B.



Obrázek 2 Starší aplikace proudového přístroje Rue Manufacturing Co.

2.2 Základní vlastnosti proudových přístrojů

Tato zařízení se používají tam, kde je k dispozici dostatek hnacího média. Použijeme je tedy tam, kde náklady na pořízení elektromotoru s kompresorem či čerpadlem, pro mnohem hospodárnější provoz, nevyváží zisk z větší účinnosti plynoucí z tohoto uspořádání proti proudovým kompresorům. Tyto přístroje jsou dále využívány pro odsávání prostředí, která jsou výbušné nebo mají korozivní účinky. Zde vstupuje do úvah o pořízení rovněž riziko poškození zařízení při výbuchu nebo následek korozivního působení, což by mělo za následek výměnu opotřebovaných částí.

Výhody proudových kompresorů

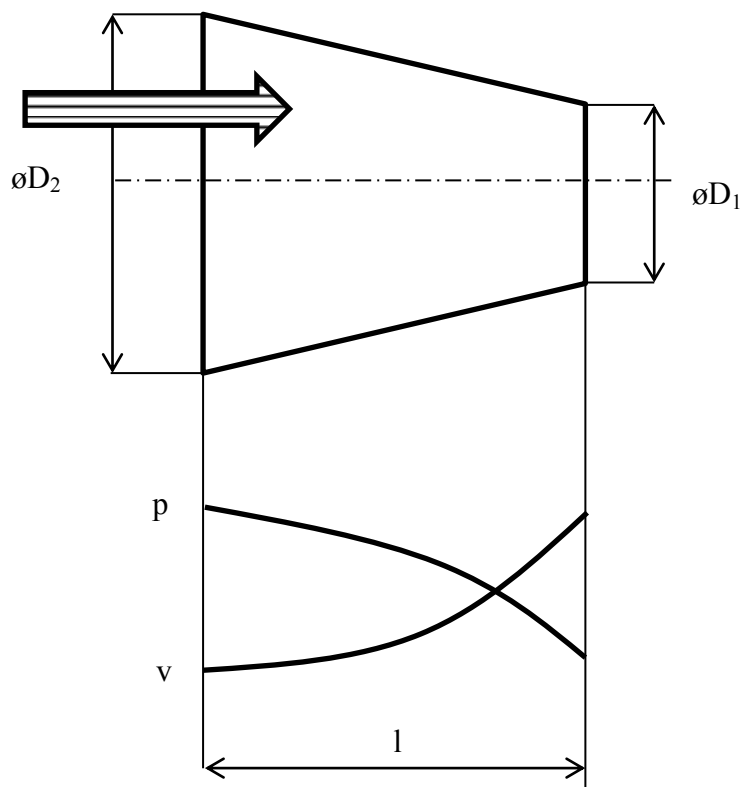
- Jsou konstrukčně jednoduché
- Nemají žádné rotační části
- Lze je vyrábět z jakéhokoliv materiálu - ocel, bronz, nerezová ocel
- Mohou se používat pro výbušné a korozivní prostředí
- Velmi levné pořizovací náklady

Nevýhody proudových přístrojů

- Nízká účinnost

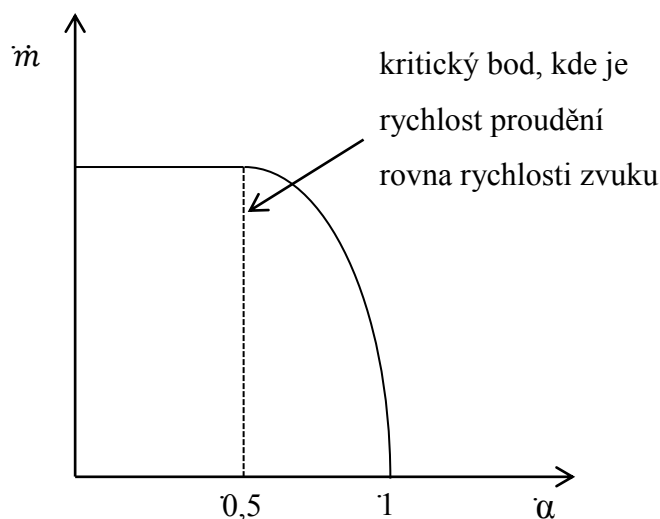
2.3 Dýza

Dýza je zařízení sloužící k přeměně tlakové energie na kinetickou. Tuto činnost zajišťuje změnou průřezu. Od clony se liší tím, že toto zmenšení průřezu je plynulé.



Obrázek 3 Podkritická dýza spolu s průběhy rychlosti a tlaku

Takto tvarovaná dýza je schopna urychlit médium až do rychlosti zvuku. [Na Obrázku 3] je zobrazen teoretický průběh tlaku ($p[\text{Pa}]$) a průběh rychlosti ($v[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$) po délce dýzy ($l[\text{m}]$). Toto chování tekutin dokládá část Bendemanovy elipsy, jež popisuje závislost mezi dopravovaným množstvím a tlakovým poměrem.



Obrázek 4 Část Bendemanovy elipsy

Na grafu, jež je částí Bendemannovy elipsy [Obrázek 4] můžeme vidět závislost změny dopravovaného množství \dot{m} [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] na tlakovém poměru α [$\text{Pa} \cdot \text{Pa}^{-1}$], který se vypočítá jako podíl absolutních tlaků, mezi kterými médium proudí. V dýze tedy expanduje pracovní médium. Cílem výpočtu dýz je určit výstupní rychlost a průřez. Ideální stavovou změnou je pro dýzy izoentropická, z toho vyplývá bilanční rovnice:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i_2 + \frac{c_{2,ie}^2}{2} \quad (2.1)$$

Z této rovnice je neznámou rychlost c_2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a mohou nastat tři různé stavy.

- $c_2 < c_{krit}$
- $c_2 = c_{krit}$
- $c_2 > c_{krit}$

Přičemž c_{krit} je mezní rychlost šíření tekutiny v daném prostředí. Tato rychlost je totožná s rychlostí zvuku a [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

$$c_{krit} = a = \sqrt{\chi \cdot r \cdot T_{krit}} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.2)$$

a- rychlost šíření zvuku v daném prostředí

χ - izoentropický koeficient (volí se podle počtu atomů molekul, ze kterých se skládá prostředí)

r - měrná plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_{krit} - teplota prostředí [K]

Pro určení entalpie i_2 je nutné určit teplotu a tlak. Tlak bývá volený. Volí se tak, aby byl menší než tlak nasávaného média, aby vznikla "potřeba" pro proudění do proudového přístroje. Hodnota tlakového rozdílu je věcí zkušeností a je důležité mít na paměti, že pokud je přístroj opatřený difuzorem, bude třeba médium stlačit na požadovanou úroveň. Difuzor, který transformuje kinetickou energii na tlakovou, má poměrně velké tlakové ztráty. Proto zvolení příliš nízkého tlaku není optimální.

Teplota po expanzi vychází z rovnice pro izoentropickou změnu:

$$p_1 \cdot v_1^\chi = p_2 \cdot v_2^\chi \quad (2.3)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\chi = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\chi}{\chi-1}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} [\text{K}] \quad (2.4)$$

Nyní už máme vše pro výpočet entalpie po expanzi v dýze. Zbývá určit výtokový průměr dýzy. Ten se určí z rovnice kontinuity pro stlačitelné látky.

$$\dot{Q}_v = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.5)$$

$$\dot{m} = \rho_1 \cdot c_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot S_2 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.6)$$

$$\dot{m} = \rho_2 \cdot c_{2,ie} \cdot S_2 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$S_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \cdot c_{2,ie}} [\text{m}^2] \quad (2.7)$$

Z této rovnice lze snadno dopočítat výstupní průřez.

Jednoduchý tvar dýzy nedovoluje překročit výtokovou rychlost nad rychlost zvuku. Pro tento případ je třeba zdokonalit tvar, neboli použít de Lavalovu dýzu. Na výstupu z ní, bude rychlost $c_2 > c_{\text{krit}}$.

2.4 De Lavalova dýza

De Lavalova dýza neboli konvergentně - divergetní tvar dýzy je zařízení, které transformuje tlakovou energii na kinetickou. Na rozdíl od klasické dýzy není výstupní rychlost omezena rychlostí zvuku.

Na schématu [Obrázek 5] vidíme jak se mění tlak p [Pa] a rychlost v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] na délce l [m] de Lavalovy dýzy. Oblast, kde se rychlost ustálí na rychlost zvuku, se volí co nejkratší a na teoretickém příkladě by se zmiňovat nemusela. Toto místo je při teoretickém uvažování a zanedbání veškerých ztrát (víření, tření o stěnu dýzy, tření tekutiny samu o sebe) přesně na předělu změny průřezů. Po dosažení rychlosti zvuku se, se zvětšujícím průřezem, rychlost dále roste na úkor poklesu tlaku.

Pro popis proudění tekutin o vysokých rychlostech je vhodné použít tzv. Machovo číslo, které vyjadřuje podíl rychlosti proudění ku rychlosti zvuku v daném prostředí.

$$Ma = \frac{c}{a}; \quad a = \sqrt{\chi \cdot r \cdot T} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.7)$$

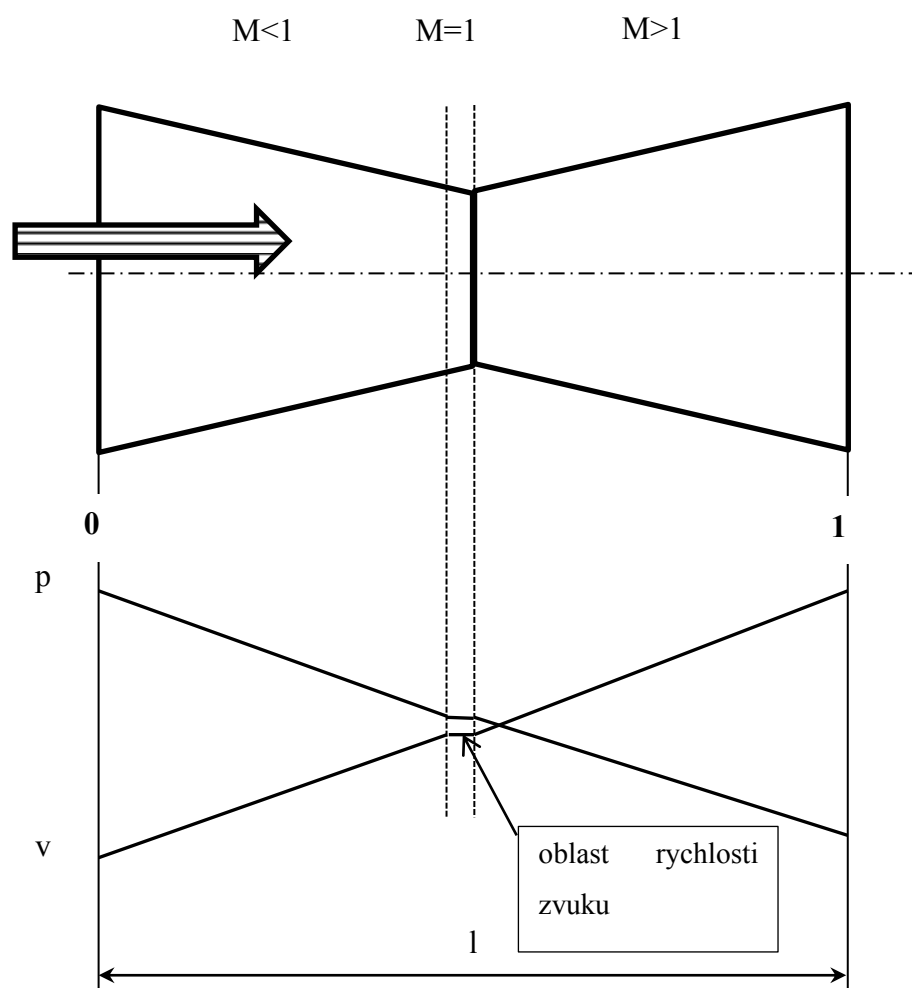
c - rychlost proudění

a - rychlost šíření zvuku v daném prostředí

χ - izoentropický koeficient (volí se podle počtu atomů molekul, ze kterých se skládá prostředí)

r - měrná plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

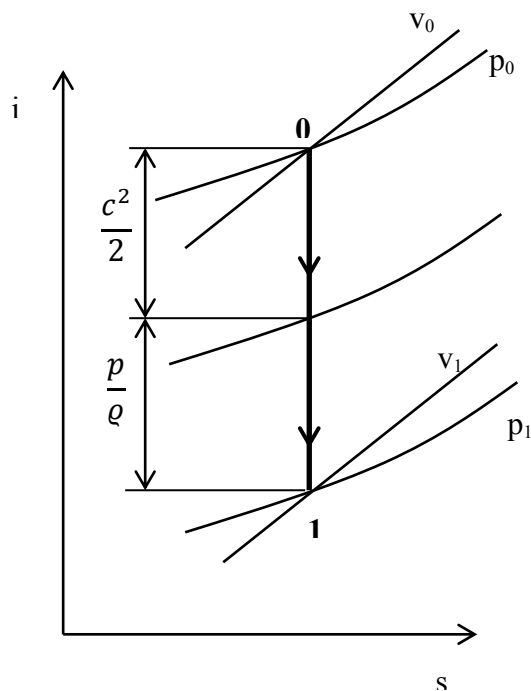
T - teplota prostředí [K]



Obrázek 5 De Lavalova dýza s vyznačenými průběhy rychlosti a tlaku

Směr proudění je naznačen šipkou. V místě přechodu průřezů musí být rychlost rovna kritické, tedy rychlosti zvuku. V případě, že by konstrukční návrh nebyl správný a rychlost za přechodovým průřezem neměla velikost rychlosti zvuku, tak by rozšiřující průřez plnil funkci difusoru.

Celou expanzi tekutiny uvnitř de Lavalovy dýzy si můžeme vykreslit i v i-s diagramu [Obrázek 6].



Obrázek 6 Expanze v De Lavalově dýze v i-s diagramu

i - entalpie [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

s - entropie [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\frac{c^2}{2}$ - vyjádření množství kinetické energie obsažené v tekutině [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$\frac{p}{\rho}$ - vyjádření množství tlakové energie obsažené v tekutině [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

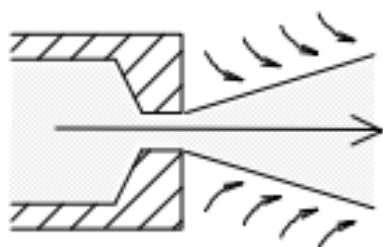
p_0 - počáteční tlak [Pa]

p_1 - tlak na konci expanze [Pa]

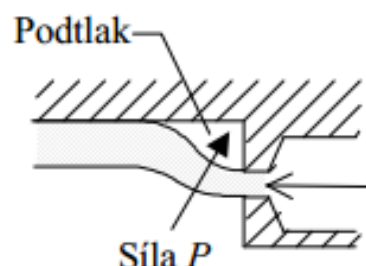
Účelem dýzy použité v mém návrhu proudového kompresoru je vyexpandovat proudící médium, tedy v mém případě vodu, pod tlak v bubnu parního kotle. Tím vznikne sací účinek, díky kterému bude proudit pára do ejektoru a ohřívat vodu. V další části proudového přístroje je důležité správně umístit začátek směšovací komory za výstupní průřez dýzy tak, aby docházelo k plynulému navázání na kuželový výstupní tvar proudícího média.

2.5 Proudění z kruhové výústky

V momentě, kdy médium proudící dýzou s kruhovým průřezem opouští její ústí, nezachovává si válcový tvar. Proudící tekutina do sebe nasává tekutinu z okolního prostředí a výsledný tvar je pak kuželový [Obrázek 8].



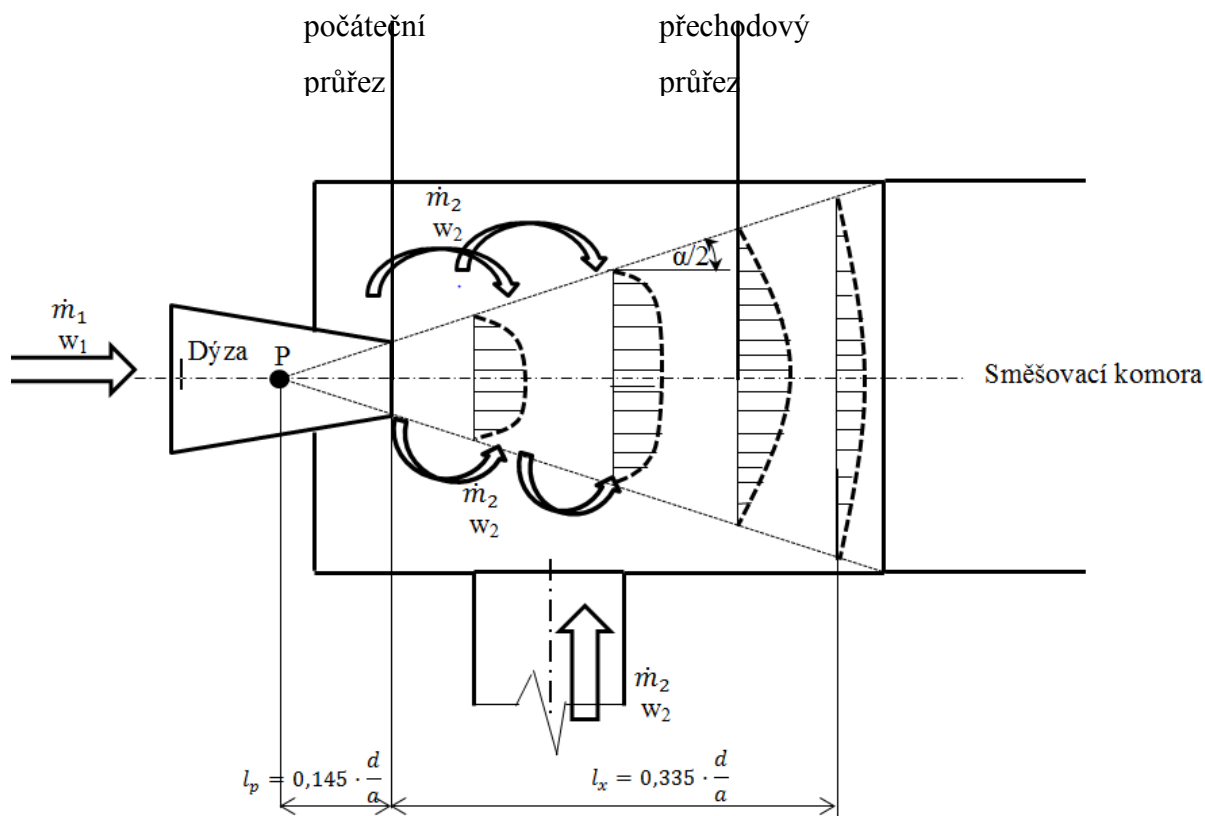
Obrázek 7 Tvar výstupního kužele výtoku proudu z dýzy



Obrázek 8 Síla působící na proud tekutiny proudící z dýzy

Tento jev se nazývá Coandův. Pohybový profil tekutiny v uzavřeném prostoru je utvářen proudem tekutiny vytékající z ústí dýzy, jejíž proudění je charakterizováno turboletním prouděním. Tedy pokud tento výtok z dýzy není ohraničen a veden v potrubí, má tato tekutina snahu nasát okolní prostředí a přilnout ke stěně [Obrázek 7].

Toto rozšiřování proudu je možno považovat za přímkové. Poloha vrcholu kužele je před ústím dýzy. Jeho vzdálenost závisí pouze na velikosti vířivého proudění u otvoru dýzy. Vezmeme-li řez kuželem tohoto proudu mohli bychom vidět, že rychlosti neklesají stejně. Rychlost v ose se z počátku nemění a je rovna výstupní rychlosti z dýzy. Rychlost klesá, jak se blíží k okraji kuželu. Celý tento proces je znázorněn na [Obrázek 9].



Obrázek 9 Grafické schéma popisující výtok z dýzy do směšovací komory

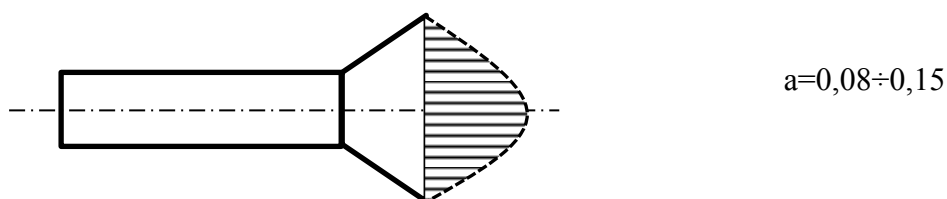
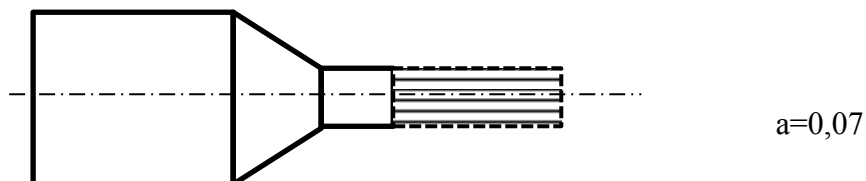
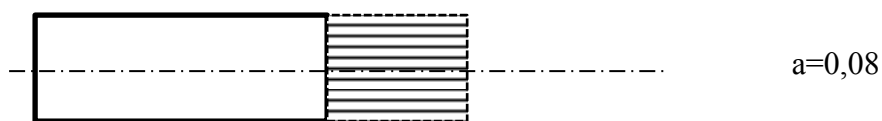
Tato disharmonie zasahuje se vzrůstající vzdáleností od ústí dýzy více do hloubky proudu až do oblasti, kde zasáhne střední vlákno na ose proudu. Toto místo se nazývá přechodový průřez. Od tohoto průřezu se začíná zmenšovat i osová rychlost. Vzdálenost tohoto průřezu od ústí dýzy závisí na faktorech:

- součinitel vířivosti - a
- průměr výstupní dýzy

Intenzita směšování roste s úhlem rozptylu proudu a ten je závislý na hodnotě součinitele vířivosti a . Pro výtok z kruhového otvoru byl odvozen a experimentálně ověřen vztah :

$$\operatorname{tg} \alpha = 3,4 \cdot a \quad (2.8)$$

V praktických výpočtech se často volí součinitel vířivosti pro kruhový výtok z dýzy $a=0,08$ a pak tedy úhel $\alpha=30,43^\circ$. Ovšem pro různé tvary výtokových otvorů se volí součinitel jinak. Zde na těchto příkladech jde vidět jak se mění součinitel vířivosti s výstupním otvorem [Obrázek 10].

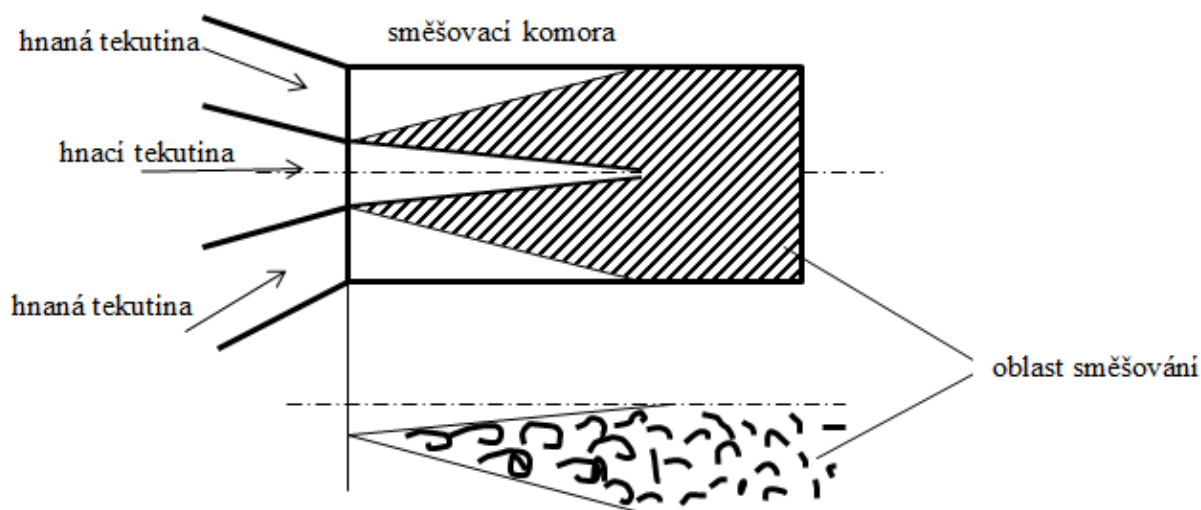


Obrázek 10 Tvary výstuních otvorů dýz se součiniteli vířivosti

2.6 Směšovací komora

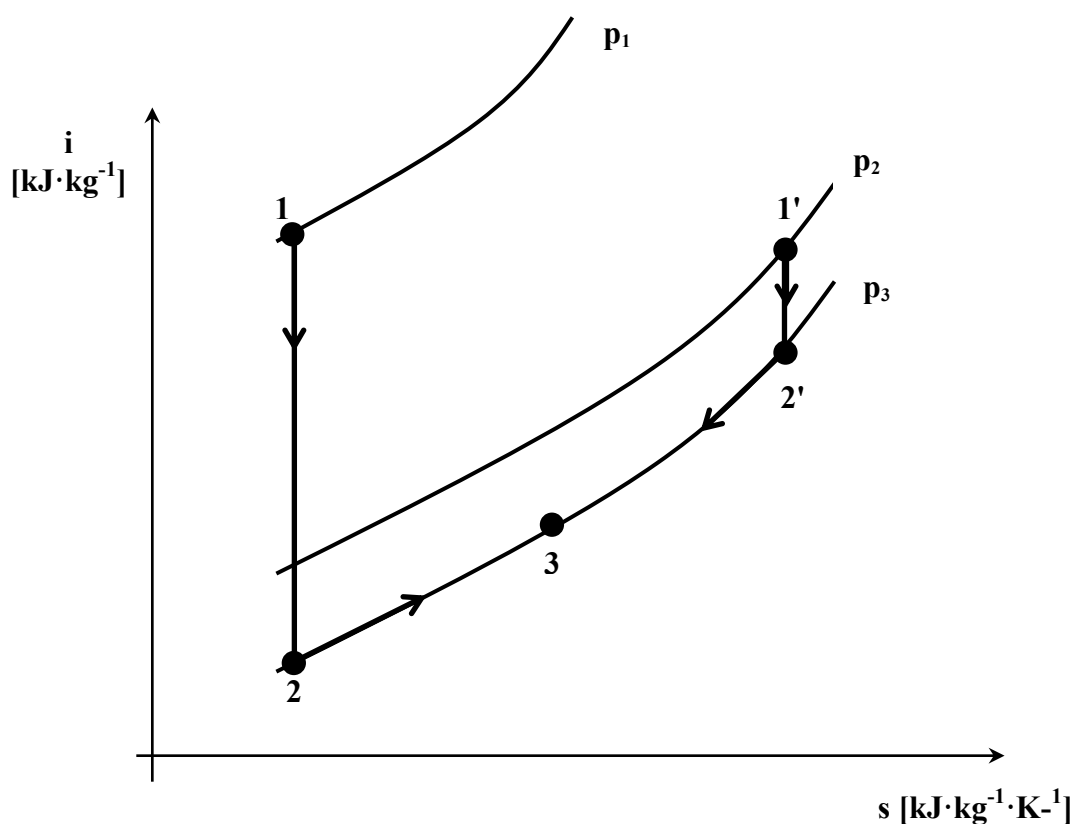
Ve směšovací komoře dochází k předání části energie z hnací tekutiny na hnanou. Toto předání dochází za pomoci proudových jevů, jež probíhají na hranicích těchto proudů, jak můžeme vidět na schématu [Obrázek 11]. Toto míšení tedy začíná již před vstupem do směšovací komory. Dochází tedy ke změnám rychlostí a v případě, že mají prostředí rozdílné teploty a tlaky, tak dochází k jejich vyrovnání. Tvar směšovací komory je závislý na proudících médiích, především jejich rychlostech.

- rovnoploché - konstantní průřez
- rovnotlaké - proměnný průřez
- speciální - speciální tvary pro fázové změny uvnitř směšovací komory



Obrázek 11 Průběh míšení ve směšovací komoře

Ideální pracovní děj pro míšení je adiabatický. Předávání energie jednoho prostředí druhému při skokové změně rychlosti způsobuje ztráty, jež vedou ke zvýšení entropie směrem k vyšším hodnotám. Míšení dělá, jako způsob předání energie, proudové přístroje konstrukčně velmi jednoduchými a levnými, ale zároveň určuje důvod jejich malé aplikovatelnosti. Míšení představuje nejvyšší energetickou ztrátu v celém přístroji.



Obrázek 12 Míšení v i-s diagramu spolu s expanzí pracovního nasávaného média

Ideální míšení v i-s diagramu můžeme vidět na [Obrázku 12]. Spolu s míšením je v diagramu znázorněná expanze hnacího a hnaného prostředí v dýze. Expanze pro hnací prostředí je znázorněno mezi body 1-2. Expanze hnaného prostředí mezi body 1'-2'. Samotné míšení je tedy mezi body 2-3 a 2'-3.

2.7 Difuzor

Difuzor bývá zpravidla poslední částí proudových kompresorů. Jeho funkcí je transformovat kinetickou energii na tlakovou za pomoci změny průřezu. Změna průřezu, tedy to jestli se bude jednat o rozšiřující či zúžující kanál, závisí na rychlosti proudění na jeho začátku. Pro podzvukovou rychlost se kanál difuzoru bude rozšiřovat a pro podkritickou rychlost naopak zúžovat. Plyne to z rovnice:

$$(M^2 - 1) \frac{dw}{w} = \frac{dS}{S} \quad (2.9)$$

Pro podzvukové proudění je člen $M^2 - 1$ záporný. Z toho plyne, že přírůstek rychlosti je nepřímo úměrný přírůstku průřezu. Tudiž se zvětšujícím se průřezem rychlost klesá. Pro potřebu mého návrhu postačí proudění podkritické.

Dalším problémem, jež se u správného návrhu difuzoru objevuje, je správný úhel rozšiřování kanálu. Je důležité, aby se mezní vrstva kolem stěn difuzoru neodtrhávala a zůstala přilehlá, neboť při nedodržení tohoto požadavku bude docházet k odtrhávání proudu od stěny a tedy silnému víření. Rovněž dochází ke zpětnému proudění média, což je silně nežádoucí, jelikož ztráty tohoto typu značně snižují účinnost.

Přeměnu kinetické energie na tlakovou lze popsat 1. zákonem termodynamiky:

$$\Delta e = \Delta \left(\frac{w^2}{2} \right) + \Delta \left(\frac{p}{\rho} \right) = 0 [J] \quad (2.10)$$

odtud:

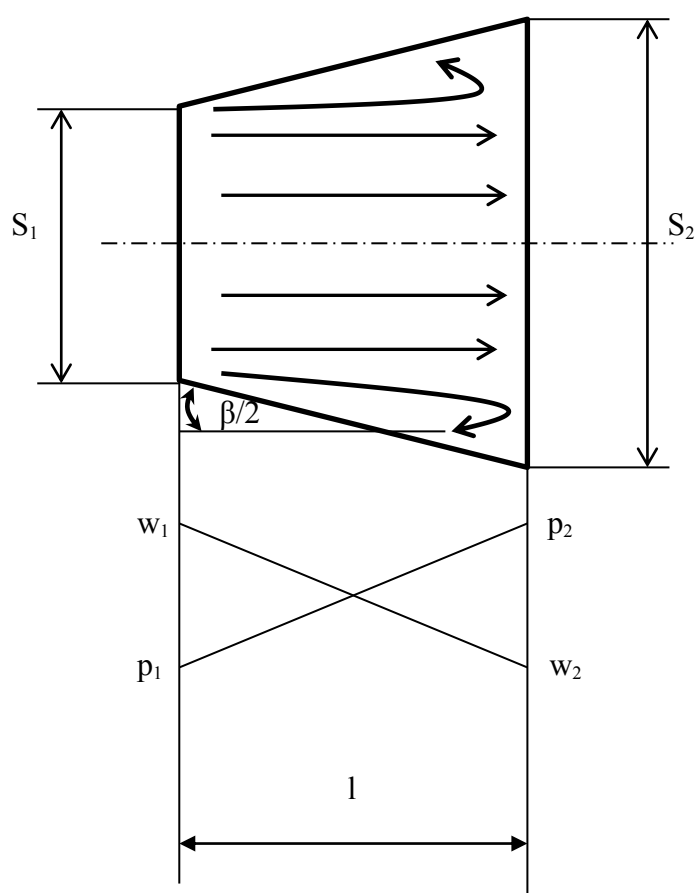
$$\Delta \left(\frac{w^2}{2} \right) = -\Delta \left(\frac{p}{\rho} \right) [J]$$

Transformaci energie lze rovněž vyjádřit pomocí tzv. součinitele plošného rozevření difuzoru, jež je závislý na diferenci mezi průřezy:

$$\mu_D = \frac{S_1}{S_2} [-] \quad (2.11)$$

Odtud pak můžeme určit tlakový součinitel, jež udává kolik energie se transformovalo z kinetické složky na tlakovou:

$$c_t = \frac{p_1 - p_2}{\frac{\rho}{2} \cdot w_2^2} = 1 - \frac{1}{\mu_D^2} [-] \quad (2.12)$$



Obrázek 13 Difuzor se znázorněním průběhu rychlosti a tlaku

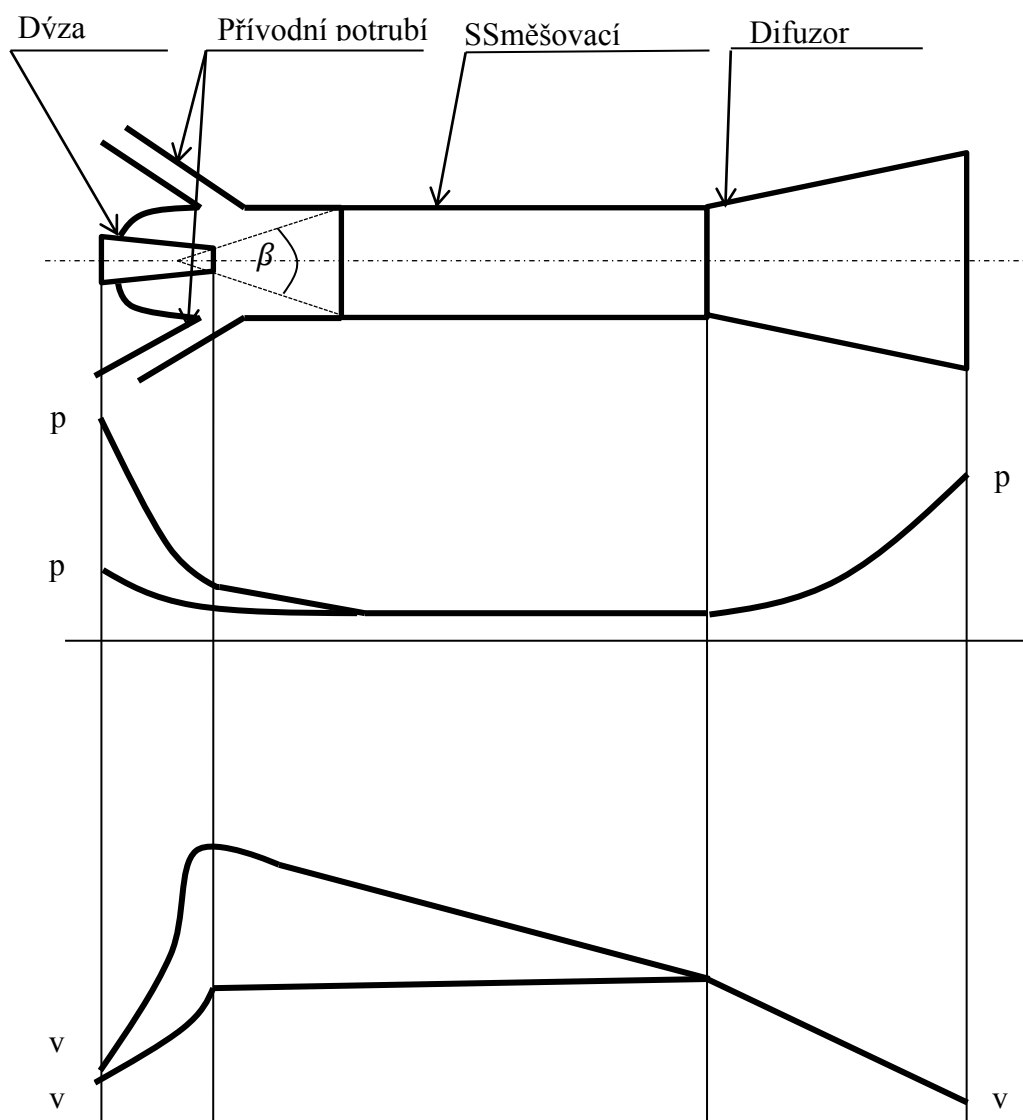
Na schématu [Obrázek 13] vidíme podkritický difusor a jak se mění rychlost a tlak po délce difuzoru. Proudnicе tekutiny znázorňují vliv odtrhávání proudu podél stěn difuzoru. Snahou je tedy pokud možno zvolit úhel $\beta [^\circ]$ rozevření difuzoru tak, aby k tomuto efektu vůbec nedocházelo, popřípadě aby jeho vliv byl co nejmenší. Čím je úhel rozevření větší, tím větší je i tlaková ztráta.

- $\beta = 6^\circ$ $\Delta p_{z,D} = 14\%$

- $\beta = 10^\circ$ $\Delta p_{z,D} = 18\%$
- $\beta = 15^\circ$ $\Delta p_{z,D} = 26\%$
- $\beta = 20^\circ$ $\Delta p_{z,D} = 42\%$

$\Delta p_{z,D}$ -tlaková ztráta v difuzoru [6]

Vykreslení průběhu rychlostí a tlaků po délce proudového kompresoru



Obrázek 14 Proudový kompresor se znázorněnými průběhy rychlostí a tlaků

p_1 -průběh tlaku pracovní látky [Pa]

p_2 - průběh tlaku nasávané látky [Pa]

p_3 - výstupní tlak [Pa]

Tlak na konci kompresoru nemůže být nikdy vyšší, než tlak pracovní látky na počátku

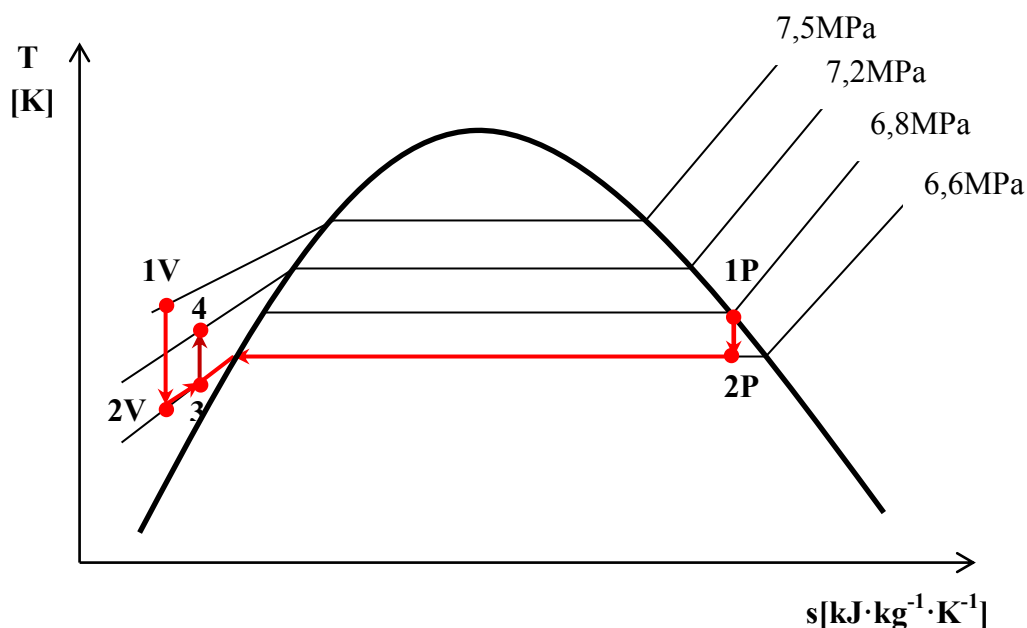
v_1 - průběh rychlosti pracovní látky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_2 - průběh rychlosti nasávané látky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_3 - výstupní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

3 Aplikace navrhovaného proudového přístroje

Navrhovaný proudový přístroj je zapojen do Rankin-clausiova oběhu jako regenerativní ohřívák napájecí vody parního kotle. Přesněji jako náhrada při poruše stabilního regenerativního ohřevu, provedenému jako klasický výměník tepla. V případě, kdy dojde k poruše stabilního vysokotlakého ohříváku napájecí vody VTO II, se uzavře regulačním ventilem vstup přiváděné napájecí vody. Obtokem půjde napájecí voda o teplotě $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $7,5\text{MPa}$ do proudového přístroje. Bude ohřívána sytou parou odebíranou sacím potrubím z bubnu kotle.



Obrázek 15 Diagram navrhovaného proudového přístroje v T-s diagramu

Znázornění průběhu dějů v proudovém přístroji jsou na T-s diagramu [Obrázek 14]. Graf jsem byl nucen vykreslit pouze přibližně, jelikož expanze v místě kapaliny nejsou prakticky viditelné. Dalším důvodem byla blízkost tlaků, se kterými proudový přístroj pracuje, což rovněž přispívalo k velké nepřehlednosti.

Dějové změny jsou vykresleny ideální :

1P-2P - děj izoentropické expanze páry

1V-2V - děj izoentropické expanze vody v dýze

2V-3 - izobarické míšení směsi vodní páry a napájecí vody ve směšovací komoře

2P-3 - izobarické míšení směsi vodní páry a napájecí vody ve směšovací komoře

3-4 - děj izoentropické komprese v difuzoru

3.1 Zapojení proudové kompresoru

Na [Schéma 1] je znázorněno zapojení proudového kompresoru do systému ohřevu napájecí vody pro parní kotel s bubnem. Ve stavu běžného provozu jsou uzavírací ventily U.V. I, III, VI a V uzavřeny. V případě výpadku vysokotlakého ohříváku napájecí vody VTO II dojde k uzavření uzavíracích ventilů U.V. I a II. Zároveň se otevírají U.V. III, IV a V. V tomto stavu dochází k ohřevu napájecí vody ve vysokotlakém ohříváku VTO I a dohřev v proudovém kompresoru, ze kterého pokračuje napájecí voda dále do ekonomizéru Eko a odtud do bubnu.

Do schématu jsem rovněž zařadil R.V. I a U.V. I pro případ výpadku VTO I. V tom případě se U.V. VI uzavře a U.V. I otevře. Napájecí voda bude proudit přímo do proudového kompresoru a R.V. I by umožňoval regulaci množství páry. Tedy úplný bypass vysokotlakých ohříváků VTO I a II. Tato možnost ovšem nebyla početně ověřena a nebyla úkolem zadání.

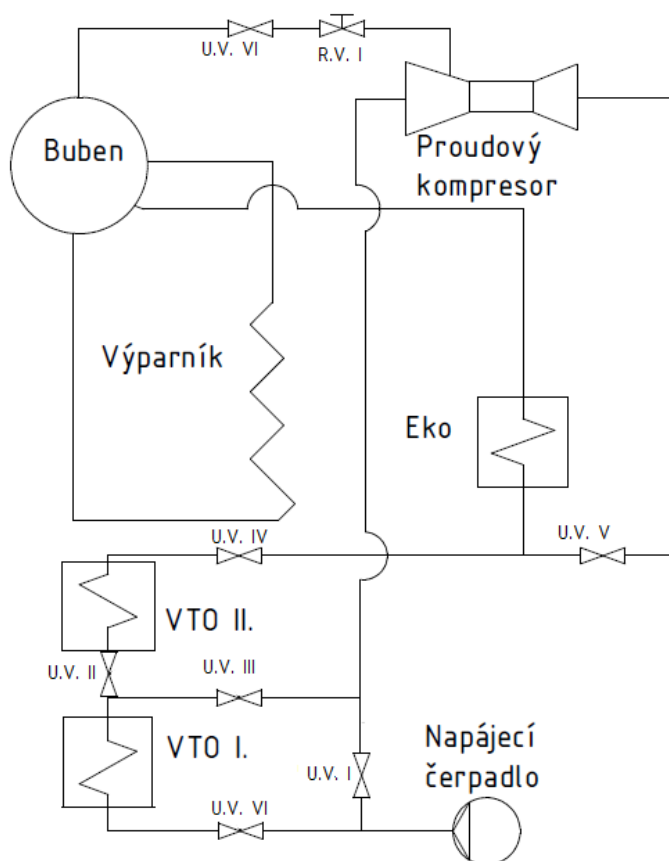


Schéma 1 Zapojení proudového přístroje v systému zásobování kotle napájecí vodou

4 Výpočtová část

4.1 Tepelný výpočet proudového přístroje

Prvním krokem výpočtové části je tepelný příkon, jež je potřeba dodat vodě, aby se ohřála ze 120°C na 145°C.

$$Q_1 = \dot{m}_{vs} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta t \text{ [kW]} \quad (4.1)$$

$$Q_1 = 20,83 \cdot 4,18 \cdot 25 = 2176,735 \text{ [kW]}$$

$$\dot{m}_{vs} = \text{ze zadání } 20,83 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta t = 25^\circ\text{C ze zadání}$$

$$c_{H_2O} = \text{z tabulek pro vodu } 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

4.2 Množství páry pro ohřev napájecí vody

Jako médium pro ohřev napájecí vody je zadaná sytá pára, jež je nasávána z prostoru bubnu kotle. Tlak v bubnu kotle je 6,8 MPa. Předpokládám tedy sytou páru o suchosti $x=1$. Její entalpii zjistím z programu EES.

$$i_p = \text{Enthalpy(Steam_IAPWS; } x=1; P=6,8)$$

$$i_p = 2775 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vstupní voda z napájecí předlohy má tlak 7,5 MPa (zadání) a teplotu 120°C (zadání). Její entalpii zjistím z programu EES.

$$i_{vs} = \text{Enthalpy(Steam_IAPWS; } t=120; P=7,5)$$

$$i_{vs} = 509 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tlak tekutiny na konci ejektoru je 7,2 MPa (zadání) a teplotu 145°C (zadání). Její entalpii zjistím z programu EES.

$$i_{vys} = \text{Enthalpy(Steam_IAPWS; } t=145; P=7)$$

$$i_{vys} = 614,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Bilanční rovnice proudového přístroje

$$\dot{m}_{vs} + \dot{m}_p = \dot{m}_{výs}$$

$$\dot{m}_{vs} \cdot \left(i_{vs} + \frac{c_{vs}^2}{2} \right) + \dot{m}_p \cdot \left(i_p + \frac{c_p^2}{2} \right) = \dot{m}_{výs} \cdot \left(i_{výs} + \frac{c_{výs}^2}{2} \right) \quad (4.2)$$

Bilanční rovnici zjednodušíme zanedbáním kinetické složky, protože rychlosti je nutno dopočítat. Chyba, která vznikne tímto krokem je nepatrná, jelikož samotná entalpie se řádově dostává na hodnoty kolem miliónu joulů. Kinetická energie, jež je funkcí rychlosti se bude řádově pohybovat kolem hodnoty desetitisíců, což je rozdíl až dvou řádů.

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{vs} \cdot (i_{vs} - i_{výs})}{i_{výs} - i_p} = \frac{20,83 \cdot (509 - 614,8)}{614,8 - 2775} = 1,02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.3 Rychlost proudění vody vtékající do dýzy

$$\dot{m}_{vs} = S_{vs} \cdot c_{vs} \cdot \rho_{vs} = \frac{\pi \cdot d_{vs}^2}{4} \cdot c_{vs} \cdot \rho_{vs} \quad (4.3)$$

$$c_{vs} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{vs}}{\rho_{vs} \cdot \pi \cdot d_{vs}^2} = \frac{4 \cdot 20,83}{946,7 \cdot \pi \cdot 0,171^2} = 0,958 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

\dot{m}_{vs} =hmotnostní tok vody vtékající do dýzy proudového kompresoru [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ_{vs} =hustota vody pro tlak 7,5MPa a teplotu 120°C vypočítána z programu EES

ρ_{vs} =Density(Steam_IAPWS;T=120;P=7,5) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

d_{vs} =průměr přívodního potrubí (zadání) [m]

4.4 Rychlost proudění vody za dýzou

Bernoulliho rovnice

$$\frac{p_1}{\rho_{vs}} + \frac{c_{vs}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{c_2^2}{2} \quad (4.4)$$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho_{vs}} + \frac{c_{vs}^2}{2} \right)} = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{7\,500\,000 - 6\,800\,000}{946,7} + \frac{0,958^2}{2} \right)} = 38,47 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

p_1 =tlak z napájecí předlohy (zadání) [Pa]

p_2 =tlak za dýzou zvolen na základě konzultace s vedoucím práce

ρ_{vs} =hustota vody vstupující do dýzy [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

c_{vs} =vstupní rychlost do dýzy [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Změnu hustoty, jež plyne z Bernouliho rovnice jsem zanedbal. Rozdíl hustot vyvolaný změnou tlaku a teploty má na výsledek velmi nepatrný vliv.

4.5 Rychlost proudění páry do proudového přístroje

Pára vstupuje do proudového přístroje a izoentropicky expanduje z tlaku v bubnu 6,8 [MPa] na tlak 6,6 [MPa]. Je tedy nutno dopočítat entalpii pro tlak 6,6 [MPa]. K tomu je nutno určit teplotu po expanzi.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_{2,p}}{p_{buben}} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \quad (4.5)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_{2,p}}{p_{buben}} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} = 557,05 \cdot \left(\frac{6\,600\,000}{6\,800\,000} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}}$$

$$T_2 = 553,2[\text{K}]$$

χ -izoentropický exponent - pro páru se volí 1,3

T_1 =teplota v bubnu v [K] $t_{\text{Buben}}=\text{Temperature}(\text{Steam_IAPWS};P=6,8\text{MPa};x=1)$

$t_{\text{Buben}}=283,9^\circ\text{C}$ tedy $T_1 = t_{\text{Buben}}+273,15$

$$T_1=557 [\text{K}]$$

4.5.1 Bilanční rovnice pro vstup páry do proudového přístroje

$$i_p + \frac{c_{p,pot}^2}{2} = i_{p,2} + \frac{c_{2,p}^2}{2}$$

$c_{p,pot}$ = rychlost páry v potrubí zanedbávám, neboť díky vysokým hodnotám energie ukryté v entalpii, má rychlost na výsledek nepatrný vliv

$$c_{2,p} = \sqrt{2 \cdot \Delta i} = \sqrt{2 \cdot (i_p - i_{p,2})} = \sqrt{2 \cdot (2775 - 1237)} \quad (4.6)$$

$$c_{2,p} = 55,46[m \cdot s^{-1}]$$

i_p -entalpie páry v bubnu

$i_{p,2}$ - entalpie páry po expanzi na vstupu do proudového přístroje, tato hodnota byla stanovena programem EES

$$i_{p,2} = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[2]; P=p_2)$$

$$i_{p,2} = 1237[kJ \cdot kg^{-1}]$$

Měrný objem páry

$$v_1 = \frac{r \cdot T_{buben}}{p_2} = \frac{461 \cdot 557}{6\,600\,000} = 0,0389[m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.7)$$

r-měrná plynová konstanta pro $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Měrný objem vody

Hustota proudící vody po průchodu dýzou byla určena z programu EES:

$$\rho = \text{Density}(\text{Water}; T=t_1; P=p_2)$$

$$\rho = 946,3[kg \cdot m^{-3}]$$

Měrný objem bude převrácenou hodnotou k hustotě :

$$v_2 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{946,3} = 1,057 \cdot 10^{-3}[m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.8)$$

4.6 Směšovací komora

Pro určení rychlosti na konci směšovací komory je třeba určit tlak na konci směšování. Pro určení tlaku je nutné vypočítat entropii na konci.

4.6.1 Bilanční rovnice mísení (entropií)

$$s_1 \cdot \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) + s_2 \cdot \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) = s_3 \quad (4.9)$$

Po roznásobení a vydělením hodnotou m_1

$$s_1 + s_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} = s_3 + s_3 \cdot \frac{m_2}{m_1}$$

Přičemž podíl m_2 ku m_1 je roven ejekčnímu součiniteli Γ

$$\Gamma = \frac{m_2}{m_1} = \frac{1,02}{20,83} = 0,049 \quad (4.10)$$

Po úpravě:

$$s_3 = \frac{s_1 \cdot \Gamma + s_2}{1 + \Gamma} = \frac{5,863 \cdot 0,049 + 1,522}{1 + 0,049} = 1,725 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Z programu EES stanoveny entropie páry a vody

$s_1 = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=283,9^\circ\text{C}; P=6,6\text{MPa})$

$s_1 = 5,863 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$s_2 = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=120^\circ\text{C}; P=6,6\text{MPa})$

$s_2 = 1,522 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

4.6.2 Bilanční rovnice mísení (entalpií)

$$i_1 \cdot \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) + i_2 \cdot \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) = i_3 \quad (4.11)$$

$$i_1 + i_2 \cdot \frac{m_2}{m_1} = i_3 + i_3 \cdot \frac{m_2}{m_1}$$

$$i_3 = \frac{i_1 + i_2 \cdot \Gamma}{1 + \Gamma} = \frac{509 + 2775 \cdot 0,049}{1 + 0,049} = 615 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.12)$$

Teplotu na konci směšování můžeme dopočítat z programu EES, díky specifické entropii a entalpii.

$t_3 = \text{Temperature}(\text{Steam_IAPWS}; s=s_3; i=i_3)$

$t_3 = 145^\circ\text{C}$

4.6.3 Měrný objem na konci směšovací komory

Na konci směšovací komory počítám s kondenzací veškeré páry na kapalinu. Uvažuji ideální míšení, čili izobarické, proto tlak na konci směšovací komory počítám se stejným tlakem $p_2 = 6,6 \text{ MPa}$.

$v_4 = \text{Volume}(\text{Water}; T=T; P=P)$

$$v_4=0,001077[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$T=145^\circ\text{C}$$

$$p=p_2=6,6\text{MPa}$$

4.7 Rychlost na konci směšovací komory

Hybnost páry

$$H_p = \dot{m}_p \cdot c_{2,p} = 1,02 \cdot 55,46 = 56,57[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (4.13)$$

Hybnost vody

$$H_v = \dot{m}_{vs} \cdot c_{2,p} = 20,83 \cdot 38,47 = 801,33[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Celková hybnost

$$H_p + H_v = H_c \quad (4.14)$$

$$H_c = (\dot{m}_{vs} + \dot{m}_p) \cdot c_3$$

$$c_3 = \frac{H_p + H_v}{\dot{m}_{vs} + \dot{m}_p} = \frac{56,57 + 801,33}{20,83 + 1,02} = 39,26[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.15)$$

4.8 Difuzor

Difuzor je poslední část proudového kompresoru, kde dochází ke transformaci kinetické energie na tlakovou.

4.8.1 Plošné rozšíření difuzoru

Tato bezrozměrná veličina udává procentuální podíl přeměny kinetické energie na tlakovou v difuzoru.

$$c_p = \frac{p_4 - p_3}{\frac{\rho}{2} \cdot c_3^2} = \frac{7\,200\,000 - 6\,600\,000}{\frac{928,505}{2} \cdot 39,26^2} = 0,84 \quad (4.16)$$

ρ -hustota na konci směšovací komory je vypočtena pomocí převrácené hodnoty měrného objemu v_4 $\rho = \frac{1}{v_4}$

p_4 -výstupní tlak z difusoru (volený na základě odborného odhadu), tlak by měl být takový, aby výstupní proud vody překonal tlakové ztráty v ekonomizéru a výparníku

4.8.2 Výstupní rychlost z difusoru

$$c_4 = (1 - c_p) \cdot c_3 = (1 - 0,84) \cdot 39,26 = 7,28[m \cdot s^{-1}] \quad (4.17)$$

4.9 Konstrukční návrh proudového kompresoru

4.9.1 Výpočet rozměrů dýzy

Průměr určíme z rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu - zanedbávám změnu hustoty.

$$S_1 \cdot c_1 = S_{vs} \cdot c_{vs} = Q_{voda} \quad (4.18)$$

$$S_1 = \frac{S_{vs} \cdot c_{vs}}{c_1} = \frac{\pi \cdot d_{vs}^2 \cdot 5}{4 \cdot 38,47} = \frac{\pi \cdot 0,171^2 \cdot 5}{4 \cdot 38,47} = 0,00298[m^2]$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (4.19)$$

4.9.2 Průměr dýzy

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00298}{\pi}} = 0,062[m] \quad (4.20)$$

4.9.3 Průměr potrubí pro přívod páry

Vycházím z rovnice kontinuity pro stlačitelnou tekutinu.

$$S_2 \cdot c_2 \cdot \rho_1 = m_p$$

$$S_2 = \frac{m_p}{c_1 \cdot \rho_1} = \frac{1,02}{1 \cdot 35,36} = 0,0288[m^2] \quad (4.21)$$

Konstrukční provedení, které navrhuji, počítá se dvěma přívodními trubkami páry do proudového přístroje z důvodu vyrovnanějšího přívodu páry a tím snížení víření.

$$S_{2,p} = \frac{S_2}{2} = \frac{0,0288}{2} = 0,0144[m^2]$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0144}{\pi}} = 0,135[m]$$

4.9.4 Vstupní průřez směšovací komory

Do směšovací komory vstupuje proud vody a proud páry. Pro výpočet minimálního průřezu vstupní části směšovací komory, uvažuji měrný objem vody vytékající z dýzy, který bude rozšířen o měrný objem páry. Potřebujeme tedy objemové průtoky vody a páry.

Objemový tok vody

$$\dot{Q}_v = v_2 \cdot \dot{m}_2 = 0,001057 \cdot 20,83 = 0,022[m^3 \cdot s^{-1}] \quad (4.22)$$

Objemový tok páry

$$\dot{Q}_p = v_1 \cdot \dot{m}_1 = 0,0389 \cdot 1,02 = 0,0396[m^3 \cdot s^{-1}]$$

Plocha potřebná pouze pro průtok vody

$$\dot{Q}_v = S_1 \cdot c_1$$

$$S_1 = \frac{\dot{Q}_v}{c_1} = \frac{0,022}{38,47} = 5,7187 \cdot 10^{-4}[m^2] \quad (4.23)$$

Plocha potřebná pouze pro průtok páry

$$\dot{Q}_p = S_2 \cdot c_2$$

$$S_2 = \frac{\dot{Q}_p}{c_2} = \frac{0,0396}{106,93} = 3,7034 \cdot 10^{-4}[m^2]$$

4.9.5 Průměr směšovací komory

$$S_{kom,1} = S_1 + S_2 = 5,7187 \cdot 10^{-4} + 3,7034 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{kom,1} = 9,422 \cdot 10^{-4}[m^2]$$

$$d_{kom,1,teor} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,422 \cdot 10^{-4}}{\pi}}$$

$$d_{kom,1,teor} = 0,0346[m]$$

Toto je minimální průměr směšovací komory z důvodu rozšiřování proudu hnacího média na výstupu z dýzy. Tento průměr je nutno dopočíst z pravoúhlého trojúhelníku [Obrázek 12]. K tomu je zapotřebí dopočítat vzdálenost ústí dýzy od začátku směšovací komory.

4.9.6 Vzdálenost měšovací komory od výstupní trysky dýzy

Při plynulé návaznosti přechodu výstupního kužele proudu hnacího média z dýzy, dosáhneme menších ztrát při víření. Dle teorie míšení proudu výstupní kužel hnacího média z dýzy je pod úhlem, vypočteným ze vztahu.

$$tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 3,4 \cdot a$$

Součinitel vířivosti se volí pro kruhový tvar výstupní dýzy $a=0,08$

$$\alpha = 2 \cdot arctg(3,4 \cdot 0,08) \quad (4.24)$$

$$\alpha = 30,43^\circ$$

Vzdálenost pólu proudu od ústí dýzy

$$l_p = 0,145 \cdot \frac{d}{a} = 0,145 \cdot \frac{0,062}{0,08} = 0,112[m] \quad (4.25)$$

Délka krajní oblasti (teoretická)

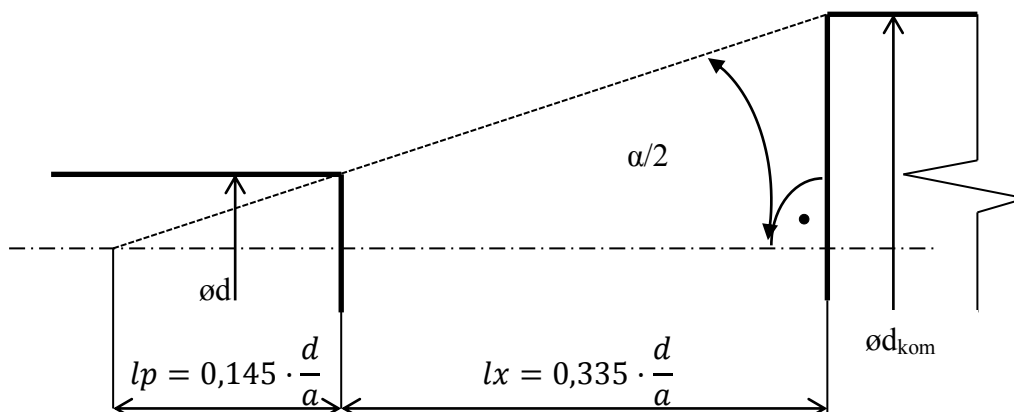
$$l_x = 0,335 \cdot \frac{d}{a} = 0,335 \cdot \frac{0,062}{0,08} = 0,259[m] \quad (4.26)$$

Skutečný průměr směšovací komory

Tuto délku je nutné dopočítat za pomoci úhlu rozevření výstupního kuželu proudnice hnacího média.

$$tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\frac{d_{kom,1}}{2}}{l_p + l_x} \quad (4.27)$$

$$d_{kom,1} = 2 \cdot tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (l_p + l_x) = 2 \cdot tg\left(\frac{30,43}{2}\right) \cdot (0,112 + 0,259) = 0,1009[m]$$



Obrázek 16 Znázornění situace výpočtu vzdálenosti směšovací komory od ústí dýzy

Průtok na konci směšovací komory

$$\dot{Q}_{sm} = v_4 \cdot (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) = 0,001077 \cdot (20,83 + 1,02) = 0,0235 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.28)$$

$$\dot{Q}_{sm} = S_1 \cdot c_1$$

$$S_{kom,2} = \frac{\dot{Q}_{sm}}{c_1} = \frac{0,0235}{38,47} = 6,1087 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2]$$

$$d_{kom,2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{kom,2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,1087 \cdot 10^{-4}}{\pi}} = 0,0649 [\text{m}]$$

4.9.7 Délka směšovací komory

Doporučená délka směšovací komory je stanovena na základě experimentálních prací.

$$l_{sk} = 8 \cdot d_{kom} \quad (4.29)$$

Jelikož v mém případě mám díky kondenzující vodní páře směšovací komoru s proměnným průřezem, jako určující průměr stanovuji střední hodnotu průměru směšovací komory.

$$d_{kom,stř} = \frac{d_{kom,1} + d_{kom,2}}{2} = \frac{0,0649 + 0,1009}{2} = 0,1288 [\text{m}] \quad (4.30)$$

Potom délka komory bude:

$$l_{sk} = 8 \cdot d_{kom,stř} = 8 \cdot 0,1288 = 1,0304 [\text{m}]$$

4.9.8 Plošné rozšíření difusoru

$$c_p = 1 - \frac{1}{\mu_D^2} - \Delta p_{zD} \quad (4.31)$$

$$\mu_D = \sqrt{\frac{1}{1 - c_p - \Delta p_{zD}}} = \sqrt{\frac{1}{1 - 0,84 - 0,14}} = 7,07 \quad (4.32)$$

Δp_{zD} -ztrátový součinitel dle úhlu rozšíření $\beta = 6^\circ$ je 14% na tlakové ztrátě

$$\mu_D = \frac{S_{dif}}{S_{kom,2}} \quad (4.33)$$

$$S_{dif} = \mu_D \cdot S_{kom,2} = 7,07 \cdot 6,1087 \cdot 10^{-4} = 4,32 \cdot 10^{-3} [m^2]$$

4.9.9 Průměr difuzoru

$$d_{dif} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{dif}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,32 \cdot 10^{-3}}{\pi}} = 0,157 [m]$$

4.9.10 Délka difuzoru

$$l_d = \frac{d_{dif} - d_{kom,2}}{2 \cdot tg\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{0,0742 - 0,0649}{2 \cdot tg\left(\frac{6}{2}\right)} = 0,4417 [m] \quad (4.34)$$

5 Závěr

Předmětem diplomové práce je návrh proudového kompresoru, jež dokáže eliminovat výpadek vysokotlakého ohřívače vody pro parní bubnový kotel. Pracovním médiem je voda z napájecí předlohy o daných parametrech, charakterizovaná teplotou, tlakem a hmotnostním tokem. Nasávaným médiem, jež napájecí vodu ohřívá, je sytá pára odebíraná přímo z bubnu parního kotle o daném tlaku.

V teoretické části se věnuji popisům jednotlivých komponent kompresoru a dějů, jež v nich probíhají. Nechybí také odvození výpočtů hlavních částí proudových přístrojů. Dále zmiňuji teorii výtoku proudu z dýzy spolu s optimálním navázáním na směšovací komoru. Návrh na zapojení proudového přístroje, dle požadavků zadání, uvádím na [Schéma č.1].

Ve výpočtové části diplomové práce se zabývám termodynamickým výpočtem proudového přístroje spolu s konstrukčním návrhem rozměrů jednotlivých komponent. Tento konstrukční návrh je doložen výkresovou dokumentací. Termodynamický návrh byl, po konzultaci s vedoucím práce, proveden s idealizujícími předpoklady dokonale vazkými tekutinami, ideálními stavovými změnami a dokonale hladkými stěnami proudového přístroje.

Hlavní úkol diplomové práce, tedy návrh proudového kompresoru, jehož úkolem je ohřát napájecí vodu na 145°C, je splněn.

Seznam použité literatury:

- [1] HIBŠ, M. *Proudové přístroje*. 2. přepracované vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981. 184 s.
- [2] KOLARČÍK, K. *Proudové kompresory*. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1994. 29 s. ISBN 80-7078-212-9.
- [3] KALČÍK, J.; SÝKORA, K. *Terchnická termomechanika*, 1. vydání Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1973, 540s
- [4] KALČÍK, J. *Technická termodynamika*. 2.vydání Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963, 568s,
- [5] KOLARČÍK, K.; KAMINSKÝ, J. *Kompresory*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava 2014, 122s

Internetové zdroje

- [6] VENTURI JET PUMPS LTD. 2014. Dostupné z: <http://www.venturipumps.com/>
- [7] ŠKORPÍK, Jiří. *Efekty při proudění vysokými rychlostmi*. 2006. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/efekty-pri-proudeni-vysokymi-rychlostmi.html#518>
- [8] ZMYŚŁOWSKI, Andrzej J. POLITECHNIKA ŚLĄSKA. Symulacja prosta dyszy pomiarowej Bendemanna. 2014. vyd. Dostupné z: <http://woiz.polsl.pl/zmyslo/Bendemann.pdf>
- [9] SLEZÁKOVÁ, Iveta. PARNÍ TURBINA S EJEKTOREM. Brno, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1265/Parn%C3%AD%20turbina%20s%20ejektorem.pdf?sequence=1>
- [10] MALLERY, Timothy J. THE CATSKILL ARCHIVE. Injectors. 1996. Dostupné z: <http://www.catskillarchive.com/rrextra/CHAPT11.Html>

Seznam obrázků

[Obrázek 1] Původní návrh proudového přístroje markýze d'Ectota

[Obrázek 2] Starší aplikace proudového přístroje Rue Manufacturing Co.

[Obrázek 3] Podkritická dýza spolu s průběhy rychlosti a tlaku

[Obrázek 4] Část Bendemanovy elipsy

[Obrázek 5] De Lavalova dýza s vyznačenými průběhy rychlosti a tlaku

[Obrázek 6] Expanze v De Lavalově dýze v i-s diagramu

[Obrázek 7] Síla působící na proud tekutiny proudící z dýzy

[Obrázek 8] Tvar výstupního kužele výtoku proudu z dýzy

[Obrázek 9] Grafické schéma popisující výtok z dýzy do směšovací komory

[Obrázek 10] Tvary výstuních otvorů dýz se součiniteli vířivosti

[Obrázek 11] Průběh míšení ve směšovací komoře

[Obrázek 12] Míšení v i-s diagramu spolu s expanzí pracovního nasávaného média

[Obrázek 13] Difuzor se znázorněním průběhu rychlosti a tlaku

[Obrázek 14] Proudový kompresor se znázorněnými průběhy rychlostí a tlaků

[Obrázek 15] Diagram navrhovaného proudového přístroje v T-s diagramu

[Obrázek 16] Znázornění situace výpočtu vzdálenosti směšovací komory od ústí dýzy

Seznam schémat

[Schéma 1] Zapojení proudového přístroje v systému zásobování kotle napájecí vodou

Seznam příloh

[Příloha A] Sestava proudový kompresor

[Příloha B] Parní potrubí

[Příloha C] Přechodová komora

[Příloha D] Směšovací komora

[Příloha E] Difuzor

[Příloha F] Příruba

[Příloha G] Víko

[Příloha H] Přívodní potrubí

[Příloha CH] Dýza